Revue Ecosystèmes et Paysages, 2024, 4 (1) : 1-17
https://lbev-univlome.com/revue-ecosysteme-et-paysage/
ISSN Online: 2790-3230

Utilisation efficiente de l'eau et stock de carbone de ligneux fourragers dans la zone sylvopastorale, au Sénégal

Water use efficiency and carbon stock of fodder trees in the silvopastoral area, Senegal.

Dossounon E. Boris[1], NDiaye Moussa[2], Sarr Mame Sokhna[3], Ndoye Maguette[1], Thiaw Mame Arona[2], Diatta Sékouna[1]

[1] Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal
[2] Centre National de Recherches Forestières (CNRF) / ISRA, Dakar, Sénégal.
[3] Centre de Recherches Agricoles (CRA Saint Louis) / ISRA, Saint-Louis, Sénégal.
() Auteur correspondant ; Email : dossounonbo@gmail.com

ORCDI des auteurs
Dossounon E. Boris : Ndiaye Moussa : ORCID Sarr Mame Sokhna : ORCID Ndoye Maguette : Thiaw Mame Arona : Diatta Sékouna : ORCID

Comment citer l'article : Dossounon E. Boris, Ndiaye Moussa, Sarr Mame Sokhna, Ndoye Maguette, Thiaw Mame Arona, Diatta Sékouna (2024). Utilisation efficiente de l'eau et stock de carbone de ligneux fourragers dans la zone sylvopastorale, au Sénégal. *Revue Écosystèmes et Paysages*, 4(1), 1-17. e-ISSN (Online) : 2790-3230

DOI : https://doi.org/10.59384/reco-pays.tg4105

Reçu : 1 mars 2024
Accepté : 15 juin 2024
Publié : 30 juin 2024



Résumé

L'étude a évalué la capacité de séquestration de carbone de quatre ligneux fourragers prioritaires (*Sclerocarya birrea Kokwaro, Balanites aegyptiaca (L.) Delile, Ziziphus mauritiana Lam. et Acacia tortilis subsp. Raddiana (Forssk.) Galasso & Banfi*) au Sénégal, ainsi que leurs caractéristiques foliaires en relation avec l'utilisation efficace de l'eau. Elle a été menée dans les unités pastorales de Labgar et Younouféré (zone sylvopastorale du Sénégal), examinant vingt-cinq (25) individus de chaque espèce, avec des mesures dendrométriques et des échantillons de feuilles prélevés pour déterminer la surface foliaire spécifique (SLA), et les compositions isotopiques du carbone (δ13C) et de l'azote (δ15N). Les résultats montrent que l'utilisation efficace de l'eau, évaluée par δ13C et δ15N, diffère significativement ($p=1.10^{-4}$ et $p=4.10^{-4}$) entre *S. birrea* et les autres espèces pour qui il n'y a pas de variation significative entre elles. La SLA est également significativement différente entre *S. birrea (*224,13 cm2g-1) et *B. aegyptiaca* (71,32 cm2g-1) ainsi que *A. tortilis* (89,14 cm2 g-1), tandis que *Z. mauritiana* ne présente pas de différence significative avec ces espèces. Concernant la séquestration de carbone, une variation hautement significative est observée entre *S. birrea* et les autres espèces (p=0,01), tandis que *Z. mauritiana* et *A. tortilis* ne diffèrent pas significativement entre elles. Statistiquement, il n'y a pas de relation significative entre l'utilisation de l'eau et la séquestration de carbone pour toutes les espèces étudiées, bien que *Z. mauritiana* présente une corrélation nulle entre ces deux facteurs, contrairement à *S. birrea*, *A. tortilis* et *B. aegyptiaca*, où la corrélation reste faible et négative (r = -0,20 ; r = -0,14 ; r = -0,26).

Mots clés : Ligneux fourragers, traits fonctionnel, eau, carbone, SLA, Ferlo

Abstract

The study assessed the carbon sequestration capacity of four priority forage woody species (*Sclerocarya birrea Kokwaro, Balanites aegyptiaca (L.) Delile, Ziziphus mauritiana Lam. and Acacia tortilis subsp. Raddiana (Forssk*.) Galasso & Banfi) in Senegal, as well as their foliar characteristics in relation to water use efficiency. It was conducted in the pastoral units of Labgar and Younouféré (sylvopastoral zone of Senegal), examining twenty-five (25) individuals of each species, with dendrometric measurements and leaf samples taken to determine specific leaf area (SLA), and carbon (δ13C) and nitrogen (δ15N) isotopic compositions. The results show that the efficient use of water, assessed by δ13C and δ15N, differs significantly (p=1.10-4 and p=4.10 -4) between S. bir-rea and the other species for which there is no significant variation between them. SLA was also significantly different between *S. birrea* (224.13 cm2g-1) and *B. aegyptiaca* (71.32 cm2g-1) as well as *A. tortilis* (89.14 cm2g-1), while *Z. mauritiana* did not show any significant difference with these species. Regarding carbon sequestration, a highly significant variation was observed between S. birrea and the other species (p=0.01), while *Z. mauritiana* and *A. tortilis* did not differ significantly between them. Statistically, there is no significant relationship between water use and carbon sequestration for all the species studied, although *Z. mauritiana* shows a zero correlation between these two factors, unlike *S. birrea, A. tortilis* and *B. aegyptiaca*, where the correlation remains weak and negative (r = -0.20; r = -0.14; r = -0.26).

Keywords : Fodder ligneous, functional traits, water, carbon, SLA, Ferlo

1. Introduction

La zone sylvopastorale du Ferlo, au Sénégal, occupe une place prépondérante dans l'économie locale, avec l'élevage comme activité dominante contribuant à 3,4 % du Produit Intérieur Brut (PIB) en 2019 selon l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Cette région est principalement caractérisée par un élevage extensif de ruminants, qui dépend largement des pâturages naturels. Pendant la saison des pluies, ces pâturages sont dominés par la strate herbacée, tandis qu'en saison sèche, ce sont les espèces ligneuses qui fournissent une part essentielle de l'alimentation des troupeaux (Ba, 2007 ; Akpo et *al*., 1995 ; Maas, 1995).

Les arbres et arbustes jouent un rôle crucial non seulement dans l'approvisionnement en fourrage ligneux, mais aussi dans la satisfaction des besoins des populations locales pendant les périodes de soudures (Sambou et *al*. 2018 ; Diop, 1989). Ils sont également utilisés en médecine traditionnelle (Dione et *al.* 2020) et contribuent à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités pastorales (Assouma et *al.* 2014). Cependant, ces ressources sont confrontées à une dégradation significative en raison des conditions climatiques difficiles et des pratiques anthropiques non durables (Sarr et *al.* 2013 ; Bassimbé, 2013), ce qui entraîne une régression des peuplements ligneux de la zone (Tappan, 2013 ; Akpo, 1996 ; Piot & Diaite, 1983).

Pour restaurer ces écosystèmes fragiles, plusieurs initiatives ont été lancées, telles que le projet sénégalo-allemand de pâturage et celui de la grande muraille verte, mais les résultats ont été mitigés (García, 2020 ; Garreta, 2020 ; Miehe, 2007). La gestion durable de ces écosystèmes arides et semi-arides nécessite une compréhension approfondie des processus d'adaptation des espèces végétales, surtout dans le contexte actuel de changements climatiques de plus en plus sévères.

Les études récentes montrent une perte de diversité parmi les espèces ligneuses du Ferlo, particulièrement marquée chez les espèces d'origine soudanienne comparées à celles d'origine sahélienne (Dendoncker et *al.* 2015). Cette situation soulève des interrogations sur leur devenir dans les milieux arides et semi-arides, en particulier leur potentiel d'adaptation face au changement climatique. Selon Lefèvre et *al.* (2015), l'adaptabilité des arbres dépend largement des facteurs environnementaux et génétiques, incitant ainsi à mener des études éco-physiologiques pour identifier les espèces ligneuses les plus adaptées aux conditions locales (Dougabka et *al.* 2021 ; Sarr et *al.* 2021 ; Dione, 2017 ; Diallo et *al.* 2015 ; Berger et *al.* 1996).

Ainsi comprendre leur adaptation et leur potentiel face aux changements climatiques est essentiel pour développer des stratégies de gestion durable et de conservation efficaces dans cette région clé du Sénégal ; d'où l'objet de la présente étude qui se concentre particulièrement sur les espèces ligneuses les plus utilisées dans l'alimentation animale dans le Ferlo, telles *qu'Acacia tortilis,*

Balanites aegyptiaca, Sclerocarya birrea et Ziziphus mauritiana (Folega et al. 2023 ; Beye et *al*. 2020 ; Bakhoum, 2013). Elle vise à mieux comprendre les relations entre ces ligneux fourragers prioritaires et leur environnement afin d'améliorer les pratiques de gestion forestière, notamment dans un contexte climatique de plus en plus rigoureux. Les objectifs spécifiques incluent : (i) la caractérisation des traits fonctionnels foliaires de ces espèces pour comprendre leur utilisation efficace de l'eau, (ii) l'évaluation de leur potentiel de séquestration de carbone, ainsi que (iii) de la corrélation entre l'utilisation efficiente de l'eau et la séquestration de carbone.

Les hypothèses formulées suggèrent que les traits foliaires influencent l'utilisation de l'eau, que les ligneux fourragers étudiés possèdent une capacité accrue de séquestration de carbone, et que l'utilisation efficace de l'eau est fortement corrélée à cette capacité de séquestration.

2. Matériel et Méthode

2.1 Description du milieu d'étude

Cette étude a été menée dans les Unités Pastorales de Labgar et Younoufere, situées dans la région sahélienne du Ferlo (Figure 1). Le climat y est caractérisé par une longue saison sèche de neuf (9) mois avec l'harmattan, suivie d'une saison humide de trois (3) mois sous l'influence de la mousson. La pluviométrie annuelle varie entre 100 et 500 mm avec une répartition irrégulière des précipitations. Ces zones appartiennent aux formations sédimentaires du continental terminal (Sarr, 2002). Les sols, principalement sableux, sablo-argileux et argilo-sableux, soutiennent une végétation dominée par des ligneux arbustifs et un tapis herbacé principalement composé de graminées annuelles, atteignant 0,5 à 1 m de hauteur à la fin de la saison des pluies (Akpo et *al*., 1995). La population locale se compose principalement de Peulhs (85%) ainsi que de Wolofs, Maures et Sérères (15%) (Ninot, 2008). Des transhumants en provenance du Bassin arachidier, de la vallée du fleuve Sénégal, et d'autres pays voisins tels que la Mauritanie et le Mali, rejoignent également ces zones. L'activité dominante dans ces régions est le pastoralisme.

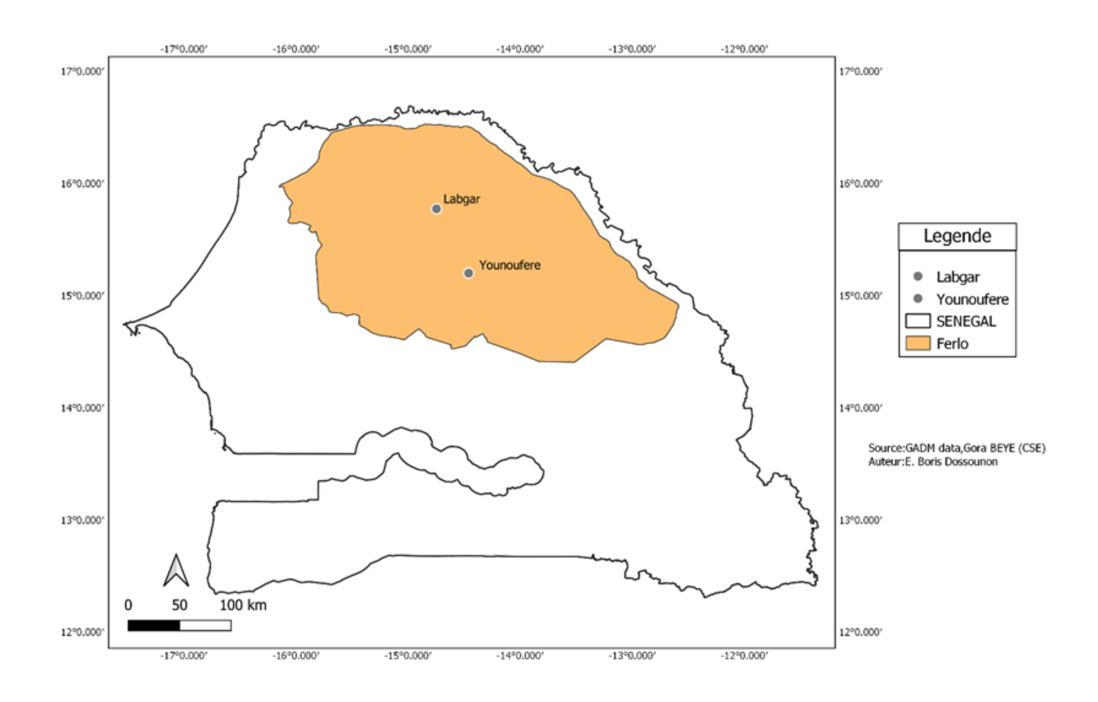


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude (zone sylvopastorale du Ferlo)

✓ L'unité pastorale de Labgar

Labgar est une commune qui fait partie du département de Linguère, dans la région administrative de Louga. Elle occupe 866,1 km^2 de superficie, ce qui représente 35,8% de la surface totale de l'arrondissement de Dodji, qui est de 2414 km^2. Elle est bordée au Nord par la Commune de Gamadji Sarre, au Sud par la commune de Louguéré Tioli, à l'Ouest par la commune de Tessékéré Forage et à l'Est par la commune d'Aéré Lao. Elle se trouve dans le Nord-Est du Sénégal, entre les coordonnées géographiques suivantes : 15°36' / 15°58' de latitude Nord et 14°24' / 14°54' de longitude Ouest. Elle a un climat sahélien, caractérisé par une

saison des pluies très courte (<2 mois) et une saison sèche très longue de 9 mois. En 2015 et 2016, les précipitations à Labgar étaient respectivement de 291,4 mm et 369,6 mm, avec 14 et 18 jours de pluie (ANSD, 2020). Labgar est située à 73 m d'altitude et présente un relief plat et monotone, avec quelques dunes de sable. Elle est à la limite entre le Ferlo cuirassé et le Ferlo sableux, qui subit l'érosion des sols. Son réseau hydrographique est composé de mares temporaires en saison des pluies et de nappes souterraines dépendantes de la nappe maëstrichtienne. Son sol et son climat lui confèrent une végétation sahélienne, avec des espèces ligneuses rares et épineuses, à feuilles petites et caduques.

✓ L'unité pastorale de Younouféré

L'Unité Pastorale de Younouféré, située au 15°15'42.912" Nord et 14°27'22.968" Ouest dans la commune d'Oudalaye de l'arrondissement de Vélingara-Ferlo, couvre 11 292 km², représentant 64% du département de Ranérou Ferlo et 1/20e du territoire national (PDCO, 2021). Cette région est délimitée au nord par les communes de Kanel et Pété, au sud par la région de Tambacounda, à l'est par la commune de Ouro Sidy, et à l'ouest par les communes de Lougré Thioly, Barkédji et Vélingara (Sarr, 2005). La population de Younouféré était de 901 habitants en 2013 (RGPHAE, 2013), mais elle aurait augmenté à 39 160 habitants en 2023 dans l'ensemble de la commune d'Oudalaye (ANSD, 2016). Les caractéristiques physiques et la position géographique de la région influent sur la dynamique des populations, qui dépendent de la disponibilité des ressources en eau et des pâturages (PDCO, 2021), avec une diversité ethnique comprenant des Peulhs, des Maures, des Wolofs et des transhumants Sérères.
Le climat dans la zone varie du tropical sahélien au nord au soudano-sahélien au sud, avec des températures extrêmes allant jusqu'à 48°C en mars-juin et des minimas de 37°C en juillet-février. La saison sèche dure neuf mois et la saison des pluies trois mois, avec une pluviométrie de 468,8 mm en 2022 (ANACIM, 2023), et une prédominance de l'harmattan venant du nord (Diallo, 2017).
La végétation, clairsemée, est divisée en strates arbustive et arborée, comprenant des espèces telles que *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Zizyphus mauritania*, *Acacia albida*, *Acacia senegal et Acacia tortilis* (Ba, 2019). Le tapis herbacé est principalement constitué de *Zornia glochidiata*, *Schoenfeldia gracilis*, *Andropogon pseudaprieus*, *Pennisetum pedicellalum*, *Alisycarpus avolifolius et Spermacoae stachydea* (Ba, 2019), offrant une valeur qualitative appréciable aux pâturages.
L'hydrographie comprend des eaux de surface (mares et marigots) et des eaux souterraines, essentielles pour l'élevage, l'agriculture et les usages domestiques, bien que leur exploitation excessive en saison des pluies soit un défi. Les eaux souterraines sont captées par des puits de profondeur variant entre 50 et 80 m, ainsi que par la nappe maestrichtienne située à 322 m de profondeur, avec d'autres nappes intermédiaires (PCDO, 2021).

2.2. Collecte des données

✓ Matériel végétal

Notre étude porte essentiellement sur des ligneux fourragers prioritaires de la zone sylvopastorale. Il s'agit de *Balanites aegyptiaca (L.) Delile. ; Acacia tortilis subsp. Raddiana (Forssk.) Hayne.; Sclerocarya birrea (A. Rich.) Hochst.* et *Ziziphus mauritiana Lam*. Ces espèces contribuent significativement à l'alimentation du bétail surtout en période de soudure. Selon les perceptions paysannes, 81 % des éleveurs utilisent ces espèces ligneuses fourragères (Beye et *al*., 2020; Bakhoum et *al*. 2020).

✓ Echantillonnage des individus ligneux

Au prime abord, il a été procédé à la géolocalisation des sites et des individus d'arbres échantillonnés à l'aide d'un GPS Garmin 64S et à l'identification des ligneux étudiés (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia tortilis subsp. raddiana*, *Sclerocaria birrea* et *Ziziphus mauritiana*). Secundo, les individus des espèces ayant fait objet de mesures ont été choisis suivant un transect Nord-Sud. Un nombre de vingt-cinq (25) individus en bon état sanitaire ont été échantillonnés pour chaque espèce (Figure 2).

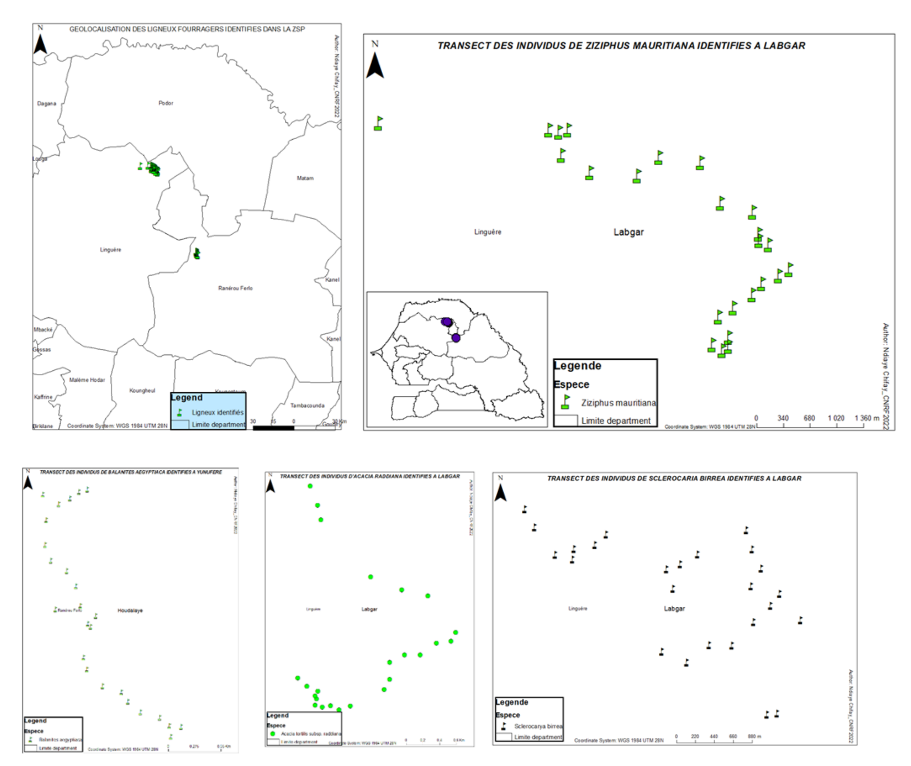


Figure 2. Géolocalisation des ligneux échantillonnés dans les unités pastorales de Younuféré (Ranérou Ferlo) et Labgar (Linguère)

✓ Mesures dendrométriques

La mesure de la hauteur, du diamètre du tronc et du houppier moyen a été effectuée sur chaque individu échantillonné. La hauteur des arbres a été mesurée à l'aide d'un Hypsomètre Vertex 5 (Haglof, 2002). Le diamètre du tronc a été mesuré à hauteur de poitrine à 1,3 m du sol à l'aide de compas forestiers et le houppier Nord-Sud Est-Ouest à l'aide d'un décamètre.

✓ Détermination de la Surface Foliaire Spécifique (SLA) et analyse isotopique

Détermination de la Surface foliaire spécifique (SLA)

Des feuilles saines et matures ont été prélevées sur les quatre directions Nord-Sud ; Est-Ouest du houppier des arbres robustes sélectionnées sur la base de la maturité. Les feuilles prélevées ont été mises dans des isolants étiquetés et dans une glacière pour conserver leur humidité avant le travail au labo. Les feuilles ont été scannées à l'aide d'un scanner Cannon scan Lide 100. Le logiciel photo filtre a été utilisé pour la conversion de l'unité standard pixel des images scannées en cm afin de connaitre les références de taille pour calculer leurs surfaces. La surface de chaque feuille a été déterminée à l'aide du logiciel Image J (Figure. 3).

Les échantillons de feuille ont ensuite été séchés à l'étuve pendant une durée de 72h à une température de 60°C. Après leur passage à l'étuve, les feuilles ont été pesées sur une balance de précision de 200 g d=0,01g (KERN EMB). Cette opération de pesage a été réalisé afin d'avoir la masse de matière sèche qui sera utilisée dans le calcul de surfaces foliaires spécifique (SLA).

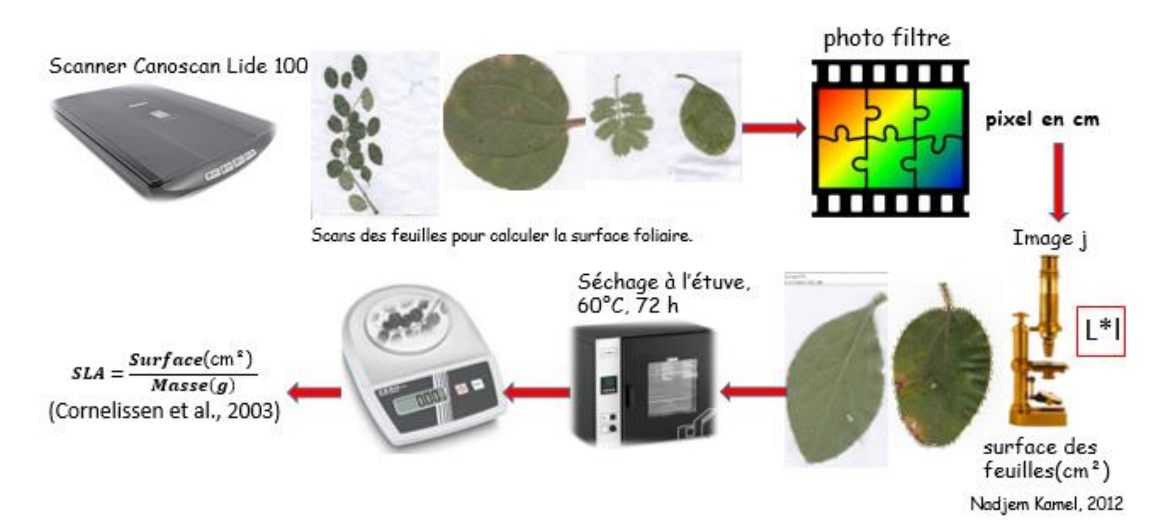


Figure 3. Processus technique de détermination de la SLA

La surface foliaire spécifique (SLA) a ensuite été calculée à partir de l'équation suivante : $\boldsymbol{SLA} = \frac{\boldsymbol{Surface}(\text{cm}^2)}{\boldsymbol{Masse}(\boldsymbol{g})}$

La surface de la feuille est en cm² et la masses sèche en g (Cornelissen et *al.* 2003).

✓ Analyses isotopiques (utilisation efficiente de l'eau)

La composition isotopique en carbone et en azote pour chacune des espèces étudiées, a été analysée par le laboratoire 'Center for Applied Isotope Studies' de l'Université de Georgia, USA. Les échantillons de feuilles, une fois collectées, ont été immédiatement séchés à l'air libre. Les feuilles sèches ont été ensuite préparées à l'ISRA avant l'envoi par DHL à l'Université de Georgia. La préparation consistait à les broyer et tamiser et mis en capsule. La méthode permet de convertir le carbone et l'azote en dioxyde de carbone (CO^2) et en oxyde nitrique (NO), qui peuvent ensuite être mesurés à l'aide d'un spectromètre de masse. Les isotopes de carbone et d'azote sont mesurés en comparant les ratios de C^{13}/C^{12} et de N^{15}/N^{14} dans les échantillons avec des étalons de référence. Les résultats sont exprimés en delta (δ) par rapport à l'étalon, qui représente la différence relative en pourcentage entre la composition isotopique de l'échantillon et celle de l'étalon. Les résultats de l'analyse isotopique peuvent être utilisés pour comprendre les processus biologiques et écologiques qui influencent la composition isotopique des feuilles d'arbres. Par exemple, la composition isotopique du carbone peut révéler l'utilisation de différentes voies de photosynthèse, tandis que la composition isotopique de l'azote peut révéler la source d'azote utilisée par l'arbre.

✓ Estimation du potentiel de séquestration de carbone des ligneux fourragers étudiés

Les données d'inventaire classique collectées sur un échantillon d'un hectare dans chacune des sites d'intervention ont été saisies, traitées et analysées avec le tableur Excel en ayant recours à plusieurs paramètres pouvant expliquer le comportement des peuplements inventoriés. Ainsi, sur cette base, la richesse/diversité floristique ainsi que le niveau de répartition des espèces ont été déterminé à travers les indices de Shannon (H') et d'équitabilité de Pielou (E). La densité végétative des peuplements a été déterminée sur la base des effectifs d'individus adultes (Tableau 1).
L'estimation du carbone séquestrée a été possible grâce aux modèles allométriques développés par Mbow et *al.* 2013 qui permettent de quantifier la biomasse aérienne suivant l'équation polynomiale AGB (Tableau 1). Ce modèle est développé sur la base d'un échantillon de 101 arbres comportant les caractéristiques (5 cm ⩽ DBH ⩽ 41,5 cm et 2,5 m ⩽ H ⩽ 15,6 m) similaires aux paramètres des peuplements du Ferlo.
Quant à la biomasse racinaire (BGB), elle est alors déduite de la biomasse aérienne à partir de l'équation développée par Cairns et *al.* (1997) et testée avec succès par Kokou (2023), Saïdou et *al.* (2012) ; Ouédraogo et *al.* (2019) et Dembélé et *al. (*2023) (Tableau 1).

Ainsi, la biomasse totale ligneuse (BT) a été convertie en quantité carbone en la multipliant par une fraction de carbone (Taonda, 2023). De nombreuses études ont montré que la teneur en carbone bois varie entre 0,47 et 0,51 ; par convention on utilise 0,5 en

conformité avec les recommandations de GIEC (2006) ainsi qu'avec l'approche méthodologique utilisée par Saïdou et *al.* (2012). La quantité de carbone aérien stockée par les peuplements ligneux est déterminée par la formule Dt (Tableau 1). L'estimation de l'équivalent carbone CO2 atmosphérique s'est effectué en multipliant le volume de carbone par 3,67.

Tableau 1. Présentation des formules

Numéro	Formules	Sources
1	$SLA = \frac{\text{Surface de la feuille (cm2)}}{\text{masse sèche de la feuille (g)}}$	Cornelissen et *al.* 2003
2	$Dob = \frac{Ni}{S}$	Sambiani et *al.* (2023) ; Melom et *al.*, (2015) ;
3	$H' = -\sum_{i=1}^{s} \frac{Ni}{N} log_2 \frac{Ni}{N}$	
4	$E = \frac{H'}{H\ max}$	
5	$AGB = 1{,}929 * DBH + 0{,}116 * DBH2 + 0{,}013 * DBH3$	Mbow et *al.* 2013 ; Folega et *al.* 2021
6	$BGB = exp\,[-1{,}0587 + 0{,}8836 \times In\,(AGB)]$	Cairns et *al.* (1997) ; Saïdou et *al.* 2012 ; Ouédraogo et *al.* 2019
7	$BT = AGB + BGB$	
8	$Dt = Y \times 0{,}5$	GIEC, 2003 ; Mille & Louppe, 2015

2.3. Analyse des données

L'encodage des données a été réalisé à l'aide d'une fiche pour ensuite être saisies sur un tableur Excel. Les relevés dendrométriques collectés ont été saisis dans un tableur Excel. L'Analyse de Variance (ANOVA) a été réalisée avec le logiciel JMP-PRO 13 ; tandis que des scripts du logiciel RStudio 4.3.0 ont été appliqués pour déterminer à la fois les indices de Shannon et d'équitabilité de Pielou, la comparaison des moyennes à travers le test de Tukey ($p \leq 0{,}05$) et la corrélation de Person.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques généraux et potentiel de séquestration de carbone des sites d'intervention

Il ressort de l'analyse des caractéristiques généraux que le peuplement ligneux à Labgar parait plus diversifié en nombre d'espèce que celui à Younouféré (Tableau 2). Cependant, les indices de diversité des espèces de Shannon et de Piélou stipulent que les peuplements sont tous caractérisés par des diversités végétales très faibles et une répartition hétérogène des individus. Cette situation est expliquée par les valeurs des indices de (i) Shannon (H' = 0,41 <3) et (ii) Pielou (E = 0,12 <1) en dessous de la normale et proches de zéro. Par ailleurs, les résultats issus de l'évaluation écologique ont révélé que quatre (4) et trois (3) espèces avaient été respectivement répertoriées avec une densification plus élevée chez *B. aegyptiaca* (25 ind/ha à Younouféré et 38 ind/ha à Labgar) dans les UP de Labgar et Younouféré.

Tableau 2. Caractéristiques générales des peuplements des sites d'intervention

Paramètres	Younouféré	Labgar
Diversité végétale ligneuse (nombre d'espèces)	3	4
Densité (ind/ha)	11,11	21,69
Indice de diversité de Shannon (H')	0,41	
Indice d'équitabilité de Piélou (E')	0,12	

Les quantités de biomasse (épigée et hypogée), les équivalents carbones théoriques (tC/ha) et atmosphérique (tCO_2/ha) correspondantes par peuplement des zones d'intervention de l'étude sont indiquées dans le Tableau 3. Son analyse indique qu'il y'a plus de biomasse ligneuse disponible sur le peuplement de Labgar (26,79 t/ha) que celui de Younouféré (11,70 t/ha). La biomasse totale convertie en stock de carbone serait évaluée à hauteur de 13,39 *tC/ha* à Labgar et 5,85 *tC/ha* à Younouféré. L'inventaire ayant été effectué sur un échantillon d'un hectare au niveau de chaque site, la contribution en CO_2 est donc respectivement de 21,47 et 49,06 tonnes à Younouféré et Labgar.

Tableau 3. Estimation de la biomasse moyenne, du stock de carbone et du potentiel de séquestration de carbone atmosphérique par zone d'intervention

Site d'intervention	*Biomasse totale (tMS/ha)*	*Stock de carbone théorique (tC/ha)*	*Equivalent carbone (tCO_2/ha)*	*Carbone atmosphérique total séquestré par le peuplement (tCO_2)*
Younouféré	11,70	5,85	21,47	21,47
Labgar	26,79	13,39	49,06	49,06

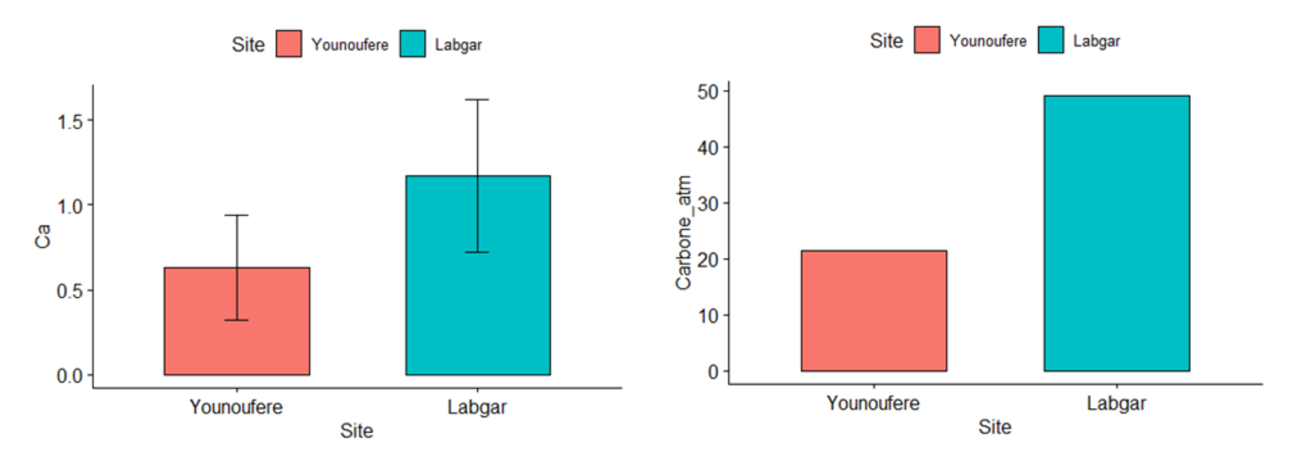


Figure 4. Distribution du stock de carbone moyen (A) et total (B) en fonction du site d'intervention

3.2. Caractéristiques structurales des ligneux fourragers étudiés

✓ Répartition des individus par classe de diamètre

L'analyse de la figure 5 montre que le milieu est caractérisé par une dominance des individus de petit diamètre. La densité des ligneux de diamètre compris entre la classe de 10 à 20 cm est relativement élevée dans le peuplement avec plus de 50 % de l'effectif.

La structure de la végétation présente une allure irrégulière bimodale. Celle-ci est caractéristique d'un peuplement de type I., c'est à dire dominé par un grand nombre d'individus jeunes (10-20 cm), un petit nombre d'individus adultes (>50 cm) et une classe intermédiaire (20-50 cm). Dans la classe adulte (DHP > 50 cm), on note une régression du peuplement avec l'absence de ligneux excepté un individu isolé de *Ziziphus mauritiana* (DHP = 112,9cm).

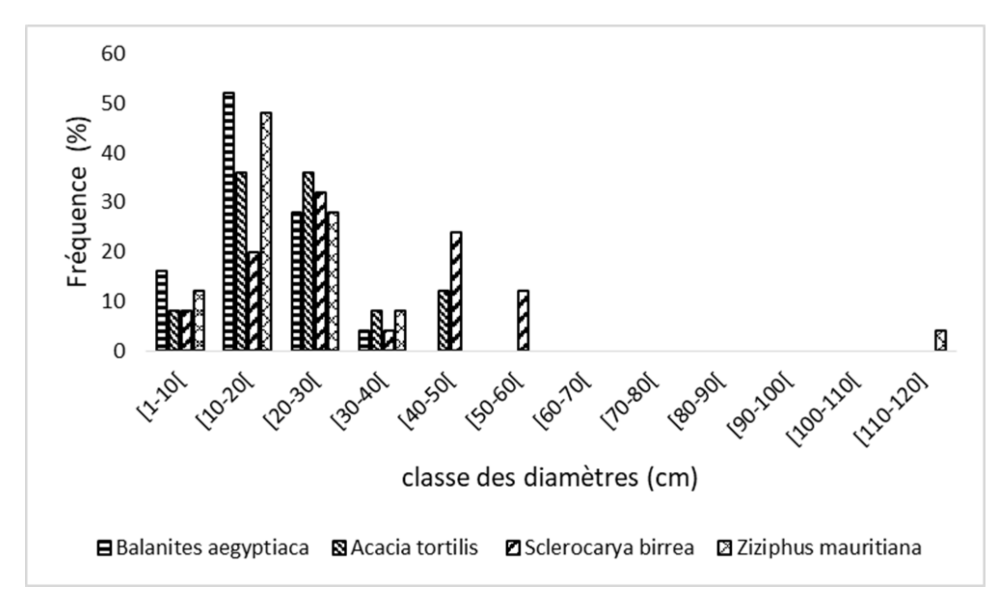


Figure 5. Répartition des individus par classe de diamètre

✓ Répartition des individus par classe de hauteur

La figure 6 montre une distribution bimodale caractéristique d'un peuplement de types II dont les individus sont répartis dans les classes supérieures et intermédiaires. Ce type de structure est caractéristique d'un peuplement arboré à arbustive. Les individus dont la hauteur est comprise entre 3 et 9 m sont largement représentatifs dans le peuplement des ligneux. Ils occupent 55 % de l'effectif total du peuplement. Les classes de hauteur de 3-6 m et 6-9 m sont de type II (en cloche) caractérisées par des effectifs réduits des petites classes de dimension et un plus grand nombre de tiges dans les classes intermédiaires, avec une distribution irrégulière des individus dans ces classes ; ce type caractérise une population en déclin du fait d'une faible régénération.

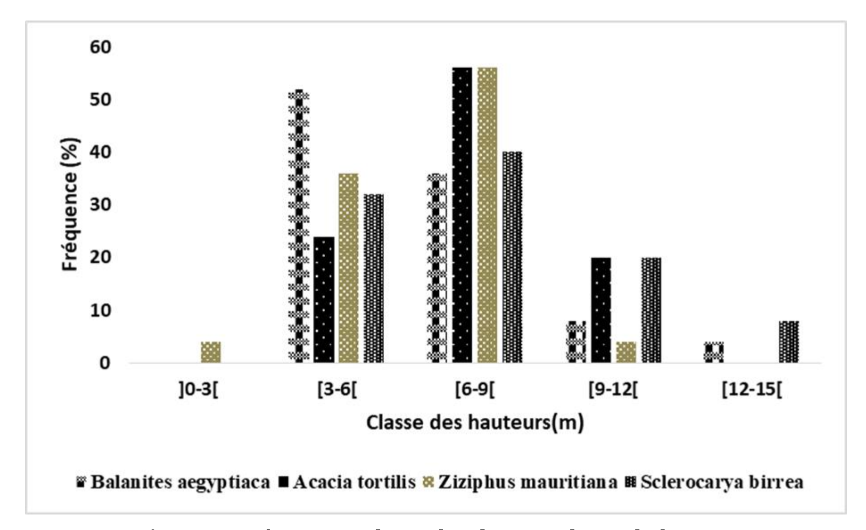


Figure 6. Répartition des individus par classe de hauteur

3.4. Composition isotopique du carbone δ13C ‰ et de l'azote δ15N ‰ au sein des espèces

La figure 7A présente les variations de la composition isotopique en carbone des différentes espèces étudiées. Selon elle, la composition isotopique en carbone varie entre -24 ‰ et -29,25 ‰ pour toutes les ligneux étudiés. *Sclerocarya birrea* présente

la composition isotopique en 13C significativement (P-value=0,0001) plus élevée que *Balanites aegyptiaca* (-29, 01 ‰) et *Ziziphus mauritiana* (-29, 25 ‰). Egalement, *Acacia tortillis* présente la composition isotopique en 13C significativement plus élevée (-27,44 ‰) que *Balanites aegyptiaca et Ziziphus mauritiana*.
La figure 7B a montré que les valeurs de la composition isotopique en azote 15 ont varié entre 5,9 ‰ et 4,2‰ pour *B. aegyptiaca* et *S. birrea*. L'analyse statistique révèle une différence significative de la composition isotopique en azote 15 entre les différentes espèces.

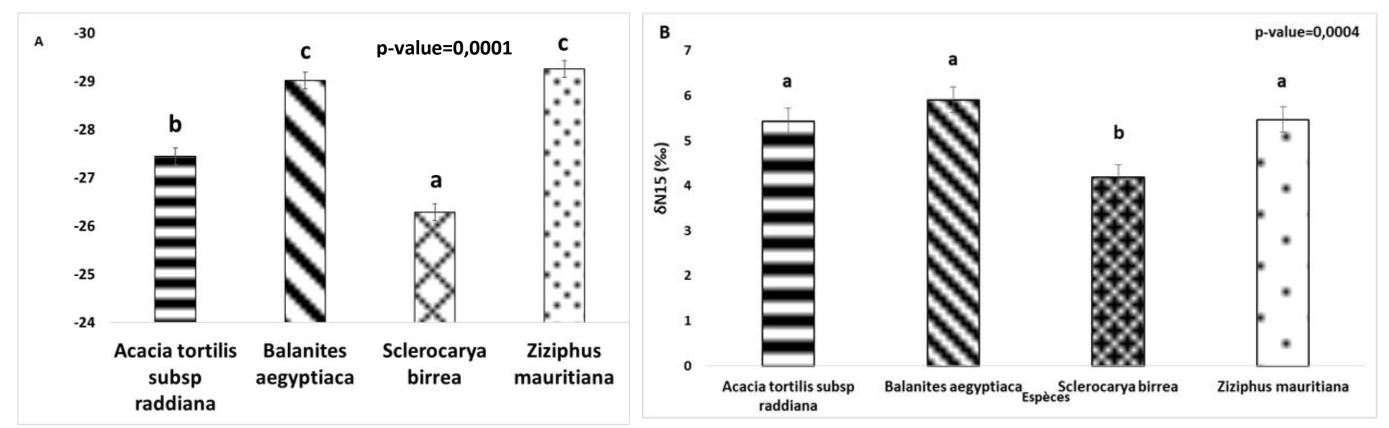


Figure 7. Variation de la composition isotopique du carbone δC^{13} (‰) (A) et de l'azote δN^{15} (‰) (B) des feuilles au sein des espèces *d'Acacia tortillis, Balanites aegyptiaca, Sclerocaria birrea et Ziziphus mauritiana.*

3.5.Variation de la surface foliaire spécifique (SLA) des espèces étudiées

La figure 8 indique les variations de la surface foliaire au sein des quatre espèces étudiées. Elle révèle que la SLA a variée entre 224,13 $cm^2\ g^{-1}$ pour *Sclerocarya birrea* à 124,02 $cm^2\ g^{-1}$ pour *Ziziphus mauritiana* en passant par 71,32 $cm^2\ g^{-1}$ pour *Balanites aegyptiaca* et 89,14 $cm^2\ g^{-1}$ pour *Acacia tortillis*). Elle montre que la SLA de *Sclerocarya birrea* est significativement plus élevée (P-value = 0.003 < α = 0,05) qu'*Acacia tortillis* et *Balanites aegyptiaca*. L'analyse statistique révèle qu'il n'y a pas une grande différence significative entre la SLA de *Ziziphus mauritiana* et celle de *Sclerocarya birrea*. Entre la SLA d'*Acacia tortillis* et celle de *Balanite aegyptiaca,* il n'y a pas aussi de différence significative.

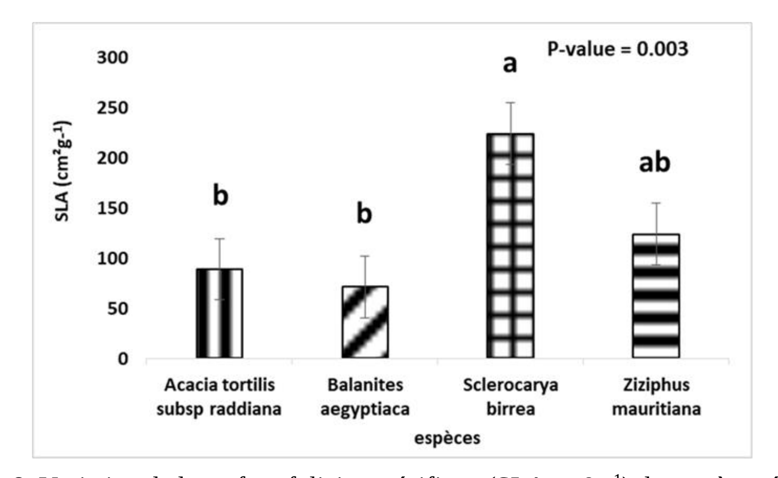


Figure 8. Variation de la surface foliaire spécifique (SLA cm^2g^{-1}) des espèces étudiées

3.6.Variation de la biomasse ligneuse, du carbone organique et atmosphérique des espèces étudiées

L'analyse du test de Shapiro-Wilk et de Bartlett au seuil de 5 % (Tableau 3) montre une variation hautement significative de la quantité de biomasse ligneuse, du stock de carbone théorique et du stock de carbone atmosphérique entre les ligneux fourragers *S. birrea et B. aegyptiaca* (p-value = 0,0127). Par contre, il ne présente pas de différence significative entre les espèces *Z. mauritiana et A. raddiana* sur la biomasse ligneuse et le stock de carbone (Tableau 4). Des quantités de biomasse moyennes de

0.653 tMS/ha ± 0.65 pour *Z. mauritiana* et 0.607 tMS/ha ± 0.27 pour *A. raddiana* ont été obtenues. Ces dernières correspondraient à 1.198 tCO2 ± 1.05 et 1.114 tCO2 ± 0.50 respectivement pour *Z. mauritiana et A. raddiana*. De façon générale, la quantité totale de carbone stockée par les quatre espèces a été plus élevée chez *S. birrea*. La tendance qui se dégageait dans les deux sites de l'étude a montré un ordre décroissant du stock de carbone des quatre ligneux fourragers schématisé comme suit : *S. birrea* > *Z. mauritiana* ⩾ *A.tortilis subsp. raddiana* > *B. aegyptiaca*.

Tableau 4. Estimation de la biomasse moyenne, du stock de carbone et du potentiel de séquestration de carbone atmosphérique par espèce fourragère étudiée

Ligneux fourragers	*Biomasse totale pour un individu ligneux (tMS/ha)*	*Stock de carbone théorique pour un individu ligneux (tC/ha)*	*Equivalent carbone atmosphérique séquestré par un individu ligneux (tCO_2)*
Sclerocaria birrea	0,81576 ± 0,81 [a]	0,40788 ± 0,19 [a]	1,49680 ± 0,71 [a]
Ziziphus mauritiana	0,65304 ± 0,65 [ab]	0,32636 ± 0,28 [ab]	1,19808 ± 1,05 [ab]
Acacia tortilis subsp raddiana	0,60744 ± 0,27 [ab]	0,30368 ± 0,13 [ab]	1,11480 ± 0,50 [ab]
Balanites aegyptiaca	0,45224 ± 0,45 [b]	0,22604 ± 0,08 [b]	0,82952 ± 0,31 [b]
Pr(>F)		0,0127	

Les moyennes portant la même lettre ne sont significativement différentes

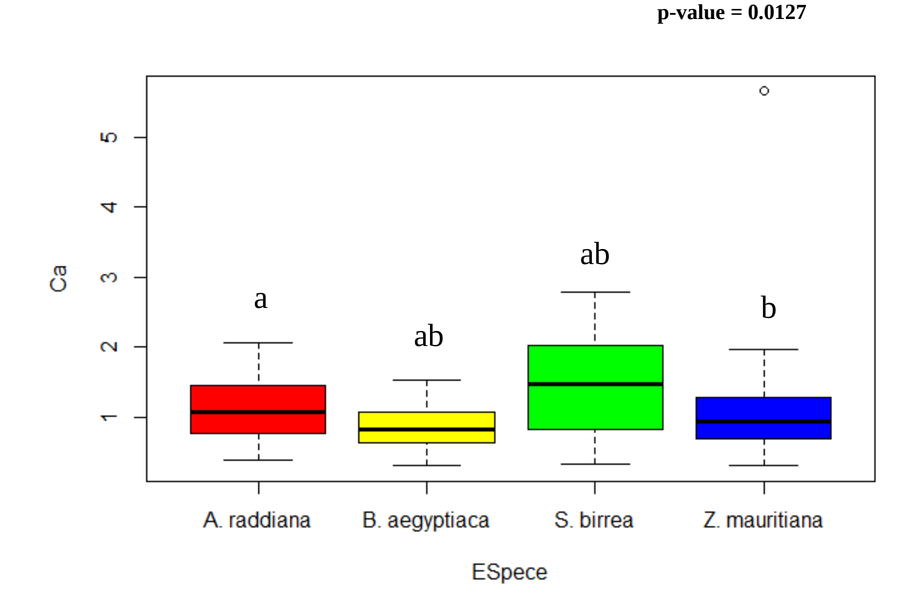


Figure 9. Distribution du stock de carbone atmosphérique moyen par type d'espèce

3.7.Corrélations entre stock de carbone et WUE

Le test de Pearson (n) indique qu'il existe généralement une corrélation c'est-à-dire un lien entre les différentes variables analysées (carbone et utilisation efficiente de l'eau). Les résultats obtenus font ressortir généralement des corrélations non significatives entre le carbone séquestré et la WUE (p-value=0.11 >alpha). Un coefficient de corrélation de 0,13 est considéré comme une corrélation faible. Cela indique à l'échelle de toutes les espèces, qu'il y a une certaine tendance entre la séquestration de carbone et l'utilisation efficiente de l'eau, mais elle n'est pas très forte.

De manière spécifique, le carbone et la WUE ne sont pas significativement corrélées (p>0,05). Cependant, à l'exception du *Z. mauritiana* où la corrélation est quasi nulle (r = -0,01), *B. aegyptiaca, S. birrea et A. tortilis subs. raddiana* sont des ligneux où le carbone séquestré est négativement et faiblement corrélée à la WUE (r = 0,26 ; r = -0,20 ; r = -0,14). Un coefficient de corrélation négatif (entre -0,5 et 0) est considéré comme une corrélation faible indiquant une faible tendance entre les variables. Cette information stipule que lorsque la valeur de la WUE augmente, la valeur du carbone séquestrée diminue de manière proportionnelle.

4. Discussion

4.1 Utilisation efficiente de l'eau des espèces étudiées

Il existe encore peu d'études sur l'utilisation efficiente de l'eau par approche isotopique. Faye et *al.* (2016) ont révélé que les valeurs de δ13C (‰) peuvent fournir des informations sur la façon dont les ligneux ferment leurs stomates afin de réguler leur utilisation de l'eau. Aussi, la même étude nous révèle que les plantes ayant des valeurs δ13C ‰ comprise entre -34 à -22 ‰ δ13C sont beaucoup plus efficientes en utilisation de l'eau. Ces résultats corroborent les nôtres qui stipulent que la composition isotopique en carbone (δ13C) des quatre espèces étudiées varie entre -29,25 ‰ et -24 ‰ avec cependant *Sclerocarya birrea* qui présente une composition isotopique en 13C (δ13C) plus élevée que les autres espèces. Rafael et *al.* (2010) révèlent dans leur recherche que chaque espèce a des adaptations différentes pour survivre dans des conditions de sécheresse et pour utiliser l'eau de manière efficace. Egalement les études de Lavergne et *al.* (2019) disent aussi que les différences de WUE peuvent être motivées par les impacts variables de l'environnement. L'utilisation efficace de l'eau varie donc probablement entre les espèces ligneuses dans le Ferlo (Sénégal) en raison de leurs adaptations uniques aux conditions locales de sécheresse et de stress hydrique. Les meilleures performances révélées chez *Sclerocarya birrea* en termes d'WUE pourraient être expliquées en partie par les résultats issus de la SLA.

Acacia tortilis subsp. raddiana quant à elle est la seconde espèce la plus riche en 13C (-27,2 ‰). Ce qui est cohérent avec les conclusions de plusieurs études antérieures. Par exemple, l'étude de Smith et *al.* (2015) a montré que *Acacia tortillis* utilise l'eau de manière efficace grâce à sa capacité à modifier la morphologie de ses feuilles en réponse aux conditions environnementales. Fawzy et *al.* (2012) ont évalué l'utilisation efficace de l'eau de quatre espèces, dont *Acacia tortilis subsp. raddiana* et *Ziziphus mauritiana*, en utilisant l'analyse isotopique du δ13C. Ils ont constaté que ces deux espèces avaient une efficacité d'utilisation de l'eau plus élevée que *Balanites aegyptiaca* et *Sclerocarya birrea*. Nabahungu (2008) a également mené une étude sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de *Ziziphus mauritiana* dans les zones semi-arides du Rwanda. Les résultats ont montré que l'espèce présente une forte efficacité d'utilisation de l'eau, ce qui la rend adaptée aux conditions arides et semi-arides. Ce qui confirme nos résultats.

La composition isotopique en 15N (δ15N), varient en fonction des conditions du sol et de l'environnement et sont généralement comprises entre 0 et 10 ‰ (Domergue et *al.*, 1999). *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, et *Acacia tortillis* ont une composition isotopique en azote N15 de 5,9 ‰ qui est plus élevé que celle de *Sclerocarya birrea* (4,2 ‰).

L'espèce *Ziziphus mauritiana* a un taux de fixation d'azote (δ15N) en dessous de la moyenne malgré qu'elle ne soit pas une légumineuse. Ce résultat confirme les travaux de Sarr et *al.* (2005) qui ont révélé dans leur étude portant sur la fixation de l'azote et son assimilation par certaines espèces ligneuses non légumineuse dans un parc de la région du Ferlo au Sénégal que des espèces ligneuses non légumineuses étaient capables de fixer l'azote de l'air dans leurs tissus, mais à des taux relativement faibles par rapport aux légumineuses. Les résultats de la présente corroborent ceux de Soumarou et *al.* (2017) qui ont examiné la capacité de certaines espèces ligneuses, dont *Acacia tortillis*, à fixer l'azote atmosphérique dans la région de Tillabéry au Niger. Les résultats ont montré que toutes les espèces étudiées, y compris *Acacia tortillis*, étaient capables de fixer l'azote atmosphérique (Oumarou et *al.* 2017). De même, une autre étude menée par Assogbadjo et *al.* (2012) a montré que *Sclerocarya birrea*, pouvait être utilisé pour restaurer la fertilité des sols appauvris en azote dans les zones arides de l'Afrique de l'Ouest (Assogbadjo et *al.* 2012). Nous pouvons donc affirmer que, bien que *Ziziphus mauritiana* et *Sclerocarya birrea* ne soient pas des légumineuses, ils ont des caractéristiques similaires à celles disposant la capacité à fixer l'azote.

4.2 Variation de la surface foliaire spécifique (SLA) des espèces fourragères étudiées

Les résultats de cette étude ont montré que la surface foliaire spécifique (SLA) varie d'une espèce à une autre. Ces résultats sont similaires aux travaux de Poupon (1980) qui ont révélé qu'une telle variation pourrait être expliquée par la différence de taille des feuilles et qu'en effet, au sein des feuilles simples, il y a une variabilité d'épaisseur, de même que pour les feuilles composées mais aussi de la teneur en eau des tissus de la feuille. Dione (2022) confirme également cette variation de SLA interspécifique et selon ses résultats, cette variation peut être influencée par plusieurs facteurs environnementaux tels que l'adaptation au climat, car chaque espèce est adaptée à un climat spécifique afin de réguler la température et la perte d'eau dans ces environnements différents.

D'après Niinemets, (2007), la surface foliaire spécifique (SLA) est souvent utilisée comme un indicateur de la capacité d'une plante à utiliser efficacement l'eau. Goldstein (2016) explique que les arbres avec une SLA plus élevée peuvent utiliser l'eau plus efficacement que ceux avec une SLA plus faible, en raison de leur capacité à maximiser leur photosynthèse tout en limitant leur perte d'eau par transpiration. Ces assertions ont été confirmées par la présente étude qui montre que *Sclerocarya birrea* a la surface foliaire spécifique la plus élevée tandis que *Acacia tortillis, Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus mauritiana* ont des valeurs plus faibles. Ce qui suggère que cette espèce est plus adaptée à une utilisation efficace de l'eau que les autres espèces étudiées. Une SLA élevée peut entraîner de grandes transpirations foliaires, ce qui permet à la plante de réguler sa température et de maintenir une hydratation adéquate. Cela peut contribuer à son utilisation efficace de l'eau tout comme entraîner une perte d'eau comme chez *Ziziphus mauritiana* qui pourrait compenser cette perte d'eau en ayant accès à des réserves d'eau plus profondes grâce à ses racines profondes (Lamarck, 2016). Dans une étude de Bouazi et *al*. (2018), ils ont utilisé une approche basée sur le calcul de la surface foliaire pour évaluer les différences génétiques et les traits éco physiologiques des deux sous-espèces *d'Acacia tortillis* en Tunisie. Il ressort que la sous-espèce *raddiana* avait une surface foliaire spécifique plus élevée, ce qui lui permettait de mieux utiliser l'eau dans des conditions arides. Berrichi et *al*. (2007) ont constaté que la structure foliaire de *Ziziphus* était plus efficace pour l'utilisation de l'eau que celle *d'Acacia tortillis* dans leurs études comparatives sur l'utilisation efficace de l'eau de deux espèces ligneuses, *Acacia tortillis et Ziziphus lotus*, en Algérie.

4.3 Carbone stocké dans la biomasse ligneuse des espèces étudiées

Parmi les quatre espèces étudiées, *S. birrea* a stocké en moyenne plus de carbone dans sa biomasse, et cela quelle que soit la zone d'étude. Les types d'écosystèmes, les conditions pluviométriques et les pratiques pastorales étant les mêmes pour l'ensemble des deux sites, le fait que les individus de l'espèce *S. birrea* aient présenté des diamètres et des houppiers supérieurs à ceux des autres espèces explique sans doute cette différence. *Z. mauritiana* et *A. raddiana*, qui se sont généralement montrés sans différence significative, se présentent comme la deuxième et troisième espèce stockant le plus de carbone après *S. birrea*. Ces Mimosaceae fixatrices d'azote bien qu'étant intégrés dans les terroirs ruraux et jouissant d'une protection à cause de ses usages multiples (Gouzis et LeFloch, 2003), se font face aux agressions anthropiques répétitives (coupes abusives, émondage, etc.) subis en milieu pastoral où le fourrage ligneux est fortement sollicité en période de soudure. Hormis ces facteurs exogènes, le déficit pluviométrique de cette zone agro-écologique favorise une croissance ralentie des tissus ligneux à travers le développement de traits d'adaptabilité (épine, taille réduite des feuilles) leur permettant une réduction maximale de l'évapotranspiration pour un usage optimum de la ressource hydrique. *B. aegyptiaca*, l'autre espèce sahélienne, a présenté la plus faible quantité de carbone stocké (0.22 tC/ha). Diatta (2015) a trouvé pour la même espèce, à travers trois technologies agroforestières (jachère, parc arboré et parcours naturel) et trois types de sol (sableux, sablo-limoneux et argileux) de la zone agro écologique des « Niayes » au Sénégal, des quantités de carbone aérienne variant entre 20 et 40 Mg C/ha avec la plus petite quantité obtenue en parcours naturel. Egalement, ce même auteur a montré une variation hautement significative du carbone stocké entre *A. raddiana et B. aegyptiaca* avec une plus grande quantité obtenue par *A. raddiana.* Ces différences entre les deux études pourraient être dues à des caractères dendrométriques comme le DHP qui caractérisent chaque type de zones suivant le gradient pluviométrique. D'après Diatta, (2015), les espèces étudiées dans les parcs de la région des « Niayes » présentent des DHP plus élevés que ceux de la zone sylvopastorale, soit respectivement 33 cm contre en moyenne 23,3 cm. Les actions anthropiques et les conditions pluviométriques pourraient expliquer les différences de stock de carbone observées entre les deux études. En général, la pression exercée sur les formations ligneuses reste très forte dans la zone sylvopastorale. Cette pression est plus accentuée sur les parcours naturels, surtout en saison sèche avec le surpâturage, où les bergers n'hésitent pas à procéder à l'élagage pour complémenter l'alimentation du bétail (Diao, 1991). Dans la zone sylvopastorale du Sénégal, comme un peu partout dans le Sahel, en saison sèche, le pâturage herbacé se faisant rare, le fourrage ligneux reste la seule alternative pour l'alimentation du bétail (Akpo et *al.* 1995 ; Sarr et *al.* 2013).

4.4 Relation entre utilisation efficiente de l'eau et carbone stocké par les ligneux fourragers

Depuis une dizaine d'années, le rôle des traits fonctionnels dans le fonctionnement des écosystèmes fait l'objet d'un questionnement important en écologie et motive de nombreuses recherches**.** Les traits fonctionnels déterminent à la fois la réponse des espèces végétales aux contraintes environnementales et leur effet sur le processus des écosystèmes. Ils permettent de mieux comprendre d'une part la réponse des plantes aux contraintes hydriques, d'autre part, leurs effets de protection contre la sécheresse. Quant à l'utilisation efficiente de l'eau (WUE), elle mesure l'efficacité d'une plante à utiliser l'eau pour produire de la biomasse. Ainsi, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence la corrélation entre le WUE et le stock de carbone de quatre ligneux fourragers prioritaires étudiés. Les plantes (*S. birrea et A. raddiana*) qui ont une WUE élevée sont considérées comme étant plus efficaces dans l'utilisation de l'eau, car pour une même quantité d'eau (ou moins d'eau), elles produisent plus

de biomasse. Cependant, en produisant de la biomasse, les espèces anéantissent leur croissance horizontale en période de grande sécheresse pour pouvoir résister aux contraintes environnementales du Ferlo. Ce faible accroissement des ligneux serrait l'une des raisons principales de la baisse de carbone séquestré, lui-même dépendant de la biomasse lignifiée (bois).
δ13C (‰), un indicateur de la fermeture des stomates et de la régulation de l'utilisation de l'eau, nous renseigne que les plantes ayant des valeurs δ13C ‰ comprise entre -34 à -22 ‰ sont beaucoup plus efficientes en utilisation de l'eau (Folega et al. 2023 ; Faye et *al.* 2016). Ce qui indique que toutes les espèces utilisées dans cette présente étude sont parmi les espèces les plus efficientes en termes d'utilisation de l'eau. Cependant l'utilisation de l'eau varie entre ces espèces ligneuses dans le Ferlo (Sénégal) en raison de leurs adaptations uniques aux conditions locales de sécheresse et de stress hydrique. Corrélée au potentiel de séquestration de carbone, la relation est faible et négative pour les espèces *S. birrea, A. tortilis subsp. raddiana et B. aegyptiaca*. Par contre, pour *Z. mauritiana*, les résultats stipulent qu'il n'y a aucune relation entre l'utilisation de l'eau et la séquestration de carbone (r = -0,01).

5. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les traits fonctionnels foliaires qui interviennent dans l'utilisation de l'eau et d'évaluer le stock de carbone de quatre espèces ligneuses fourragères dans la zone sylvopastorale au Sénégal. Au terme de cette étude, *Sclerocarya birrea* s'est distinguée par une utilisation efficiente de l'eau et une capacité de séquestration de carbone plus élevée que les autres espèces étudiées (*Balanites aegyptiaca, Acacia tortillis et Ziziphus mauritiana*), ce qui en fait une espèce prometteuse pour les programmes de restauration écologique. Egalement, le test de corrélation stipule que l'utilisation efficiente de l'eau n'est pas significativement corrélée au carbone séquestré pour toutes les quatre espèces étudiées. Toutefois, pour les espèces *S. birrea, A. tortilis subsp, raddiana et B. aegyptiaca*, la corrélation est négative entre les deux paramètres (r = -0,20 ; r = -0,14 ; r = -0,26), tandis que pour *Z. mauritiana*, la corrélation est nulle. A travers les résultats obtenus, les hypothèses de recherche relatives à l'utilisation efficiente de l'eau et à la séquestration de carbone ont été vérifiées et les objectifs atteints. Par contre l'hypothèse sur la relation entre l'utilisation efficiente de l'eau et la séquestration de carbone est rejetée.
Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les différences intra et inter-espèces dans la gestion et l'utilisation des ressources ligneuses fourragères dans la zone sylvopastorale. Ils peuvent également fournir des informations précieuses dans l'orientation des décisions en matière de conservation des écosystèmes, de reforestation dans le cadre du programme de la grande muraille verte et d'aménagement des pâturages. Cependant cette étude présente certaines limites, telles que la taille de l'échantillon et l'homogénéité des sites d'étude. Des études plus approfondies pourraient être entreprises, en élargissant l'échantillon à d'avantages d'espèces et de zones agro écologiques du Sénégal.

Remerciement

Les auteurs remercient le projet « CASSECS » piloté par le CIRAD et l'ISRA qui a financé cette étude. Ils remercient également les populations de la zone sylvopastorale du Ferlo en particulier les responsables des unités pastorales de Younouféré et Labgar.

Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	Dossounon E. Boris et Ndiaye Moussa
Gestion des données	Dossounon E. Boris et Ndiaye Moussa
Analyse formelle	Dossounon E. boris, Ndiaye Moussa et Sarr MS
Enquête et investigation	Ndiaye Moussa et Sarr MS
Méthodologie	Dossounon E. B, Ndiaye M et Sarr MS
Supervision Validation	Ndoye Maguette, Thiaw MA, Sarr MS et Diatta Sé-
Écriture – Préparation	Dossounon E. Boris et Ndiaye Moussa
Écriture – Révision	Dossounon E.B, Ndiaye M, Sarr MS et Diatta S

Références

Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie [ANSD]. (2020). Répartition de la population sénégalaise par région administrative en 2020. Rapport annuel de la division du Recensement et des Statistiques démographiques de l'ANSD, 25 p.
Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie [ANSD]. (2016). Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Matam : Situation Economique et Sociale Régionale, 10 pages.

Akpo, L. E., Gaston, A., & Grouzis, M. (1995). Structure spécifique d'une végétation sahélienne : cas de Wiidu Thiengoli (Ferlo, Sénégal). In Fonds Documentaire ORSTOM (pp. 39-52).

Akpo, L. E., Grouzis, M., & Ba, A. T. (1995). L'arbre et l'herbe au Sahel : effet de l'arbre sur la composition chimique des pâturages naturels du Nord-Sénégal (Afrique de l'Ouest). Revue Médecine Vétérinaire, 146(10), 663-670.

Arbonnier, M. (2009). Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. Edition Quae, Muséum National d'histoire Naturelle, 517.

Audry, P. (1962). Étude pédologique du centre de recherches zootechniques de Dahra.

Bassimbé, S. M. (2013). Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo (Sénégal). La Résilience En Action Dans Les Territoires Urbains, 13. https://doi.org/10.4000/vertigo.14352

Berrichi, Bouaziz, Messaoudène, & Bouzerzour. (2007). Étude comparative de l'efficience d'utilisation de l'eau chez deux espèces ligneuses en relation avec leur structure foliaire. Sécheresse, 18(1), 71–76.

Beye, A., Mbaye, T., Bakhoum, A., Sarr, O., Ngom, D., Diatta, S., & Ickowicz, A. (2020). Usages des fourrages ligneux et pratiques pastorales dans la communauté rurale de Téssékéré, Ferlo, Nord Sénégal. Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux, 73(3), 191–198. https://doi.org/10.19182/remvt.31890

Beye, G. (2015). Actualisation du découpage et de la caractérisation des zones éco-géographiques du Sénégal.

Bouazi, B., & Mita, G. (2018). Genetic diversity and ecophysiological traits of *Acacia tortilis subsp. raddiana* and *Acacia tortilis subsp. spirocarpa* in arid areas of Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 150, 9–19.

Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Allocation de biomasse racinaire dans les forêts d'altitude du monde. Écologie, 111(1), 1-11. https://doi.org/10.1007/s004420050201

Dembélé, M., Salvadore, E., Zwart, S., Ceperley, N., Mariéthoz, G., & Schaefli, B. (2023). Comptabilité de l'eau face au changement climatique dans le bassin transfrontalier de la Volta avec un modèle hydrologique calibré spatialement. *Journal d'hydrologie*, 626, 130092.

Diallo, B. H. (2017). Caractérisation du système de production agricole dans la commune de Oudalaye, Rapport de Master I, p23.

Diao, B. M. (1991). Les systèmes d'élevage dans la zone des Niayes au Sénégal : l'élevage traditionnel. Institut Sénégalais des Recherches Agricoles (ISRA). Études et document, 4(14).

Dione, A. (2022). Etude de la variabilité de la surface foliaire spécifique des espèces ligneuses du Ferlo sableux.

Dione, A., Sarr, O., Ngom, S., Diallo, A. M., & Guisse, A. (2020). Perceptions pastorales des ligneux fourragers par les agropasteurs et les transhumants au centre du Sénégal. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 14(3), 772–787. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i3.11

Dommergues, D., & Diem, H. G. (1999). Les arbres fixateurs d'azote : caractéristiques fondamentales et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux.

Fawzy, A., Rokiek, E. I., & El-Sharkawy. (2012). Water-use efficiency of some multipurpose trees under different soil and water conditions using δ13C analysis. African Journal of Agricultural Research, 7(5), 693–700.

Faye, Sarr, Sambou, Diouf, Akpo, Epron, & Gueye. (2016). Étude des échanges gazeux et des variations isotopiques de CO2 et d'eau chez des espèces ligneuses en milieu sahélien (Ferlo, Sénégal). Revue de Médecine Vétérinaire, 27, 271-282.

Folega, A. A, Folega, F., Woegan, A.Y, Wala, K., Akpagana K (2021). Dynamique des émissions de gaz à effet de serre liées au secteur foresterie et autres affectations des terres (FAT) dans le paysage du socle Eburnéen au Togo. *Rev Ecosystèmes et Paysages (Togo))* (01), 01 ; 58-72pp

Folega F, Atakpama W, Pereki H, Diwediga B, Novotny IP, Dray A, Garcia C, Wala K, Batawila K, Akpagana K. Geo-Based Assessment of Vegetation Health Related to Agroecological Practices in the Southeast of Togo. Applied Sciences. 2023; 13(16):9106. https://doi.org/10.3390/app13169106

García, M. (2020). The Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative : Filling Africa's spatial data gap. Environmental Research Letters, 104698, 15(10).

Garreta, L. (2020). Assessing the potential of the Great Green Wall initiative to combat desertification in the Sahel. Land Use Policy, 104698, 97.

GIEC. (2006). Guide pour l'inventaire national des gaz à effet de serre ; agriculture, foresterie et autre usage des terres. Institute for Global Environmental Strategies, Japon, 4, 46-52.

Goldstein, G. (2016). Ecophysiology of Amazonian palms: hydrological and carbon assimilation strategies in response to natural and anthropogenic disturbances. In P. R. & H. Poorter (Eds.), Ecophysiology of Tropical Tree Crops (pp. 17–43). Springer.

Gouzis, E., & LeFloch, E. (2003). Un arbre au désert, Acacia raddiana. IRD Éditions. Paris. Retrieved from https://www.crstra.dz/telechargement/CrstraNews/News33.pdf

Haglöf, A. B. (2002). Users guide vertex III and transponder T3. Långsele, Sweden: Haglöf Sweden, AB.Here are some references formatted in APA style based on the information provided:

Houerou, H. N. (1980). The Rangelands of the Sahel. Journal of Range Management.

IBMA GT. (2016). *Ziziphus mauritania*. Base information sur les invasions biologiques en milieu aquatique. Groupe de travail national Invasions biologiques en milieux aquatiques. UICN France et Onema. Récupéré de http://especes-exotiques-envahissantes.fr/espece/ziziphus-mauritiana/

Kebe, S., Diallo, A. M., Diatta, N., Peiry, G., & Guisse, A. (2020). Étude des caractéristiques écologiques d'un peuplement ligneux de la grande muraille verte dans le Ferlo nord, Sénégal. Revue de l'Environnement et de La Biodiversité, 5(1), 63-76.

Kokou, K. B., Atakpama, O., Kombate, B., Egbelou, H., Koffi, N. A., Elangilangi, M. J., ... Batawila, K. (2023). Dynamique et modélisation du stock de carbone de la forêt classée d'Amou-Mono au Togo. *Revue Ecosystème et Paysages* (Aller), 3(2), 1-15. https://doi.org/10.59384/recorpay.tg3211

Lavergne, A., Graven, H., De Kauwe, M. G., Keenan, T. F., Medlyn, B. E., & Prentice, I. C. (2019). Observed and modelled historical trends in the water-use efficiency of plants and ecosystems. Global Change Biology, 25(7), 2242–2257. https://doi.org/10.1111/gcb.14634

Lavorel, C., Garnier, D., Buchmann, D. G., P., R., Van Der Heijden, M. G. A., ... PoorterH. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 335–380.

Lefèvre, F., Fady, B., Jean, F., Davi, H., Pichot, C., & Oddou-Muratorio, S. (2015). Les processus biologiques de réponse des arbres et forêts au changement climatique : adaptation et plasticité phénotypique. Innovations Agronomiques, 47, 63-79. Récupéré de https://hal.inrae.fr/ARINRAE-INNOVAGRO/hal-O2632058

Mbow, C., Verstraete, M. M., Sambou, B., Diaw, T. A., & Neufeldt, H. (2013). Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan–Guinean ecosystems of Southern Senegal. Journal of Forest Research, 19(3), 340-347. https://doi.org/10.1007/s10310-013-0414-1

Miehe. (2007). Surveillance continue de la végétation dans le périmètre expérimental à Widou Thiengoly dans le cadre des projets sénégalo-allemands, 1981 – 2007. Dispositif expérimental, méthodes de suivi et perspectives d´évaluation, atelier sur le transfert du patri. 26. Récupéré de https://scirp.org/reference/ReferencePapers.aspx?ReferenceID=1100398

Mille, G., & Louppe, D. (2015). Mémento du forestier tropical. Versailles: ed. Quae. ISBN 978-2-7592-2340-4. Récupéré de https://www.quae.com/produit/1319/9782759223428/memento-du-forestier-tropical

Nabahungu, L. N. (2008). Effects of water and soil nutrient availability on biomass production and water use efficiency of Ziziphus mauritiana in semi-arid Rwanda. Journal of Arid Environments, 72(11), 2098–2105. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.004

Ndiaye, Sagna, M. B., Talla, R., Peiry, J. L., & Guisse, A. (2021). Sahelian Species in the Ferlo (North Senegal): Acacia tortilis (Forsk) Hayn essp., Raddiana (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd, and *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. Open Journal of Ecology, 11, 183-201.

Ndiaye. (2015). Déterminants de la dynamique de la végétation d'un milieu pâture en région sahélienne du Sénégal. Université Cheikh Anta Diop De Dakar.

Niinemets. (2007). Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. Plant, Cell & Environment.

Ninot. (2008). Elevage et territoire dans le « Ferlo », zone pastorale du nord du Sénégal. Presses Universitaires de Rennes.

Ouédraogo, S. J., Bayala, J., Dembélé, C., Kaboré, A., Niang, A., & Somé, A. N. (2019). Establishing jujube trees in sub-Saharan Africa: response of introduced and local cultivars to rock phosphate and water supply in Burkina Faso, West Africa. Agroforestry Systems, 68, 69-80.

Ousmane, N., Aly, D., Bassimbé, S. M., & Aliou, G. (2013). Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal. VertigO, 13(3). Récupéré de https://id.erudit.org/iderudit/1026882ar

Plan de Développement Local de la Commune d'Oudalaye. (2021-2025).

Poupon. (1977). Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. Extrait du Bulletin de I 'institut Fondamental d'Afrique Noire, Tome 39, série A, no 2, avril 1977.

Rafael, O., Mauro, S., & Dawson, T. (2010). Water use strategies of tree species in a gallery forest of the Brazilian savannah.

RGPHAE. (2013). Rapport définitif RGPHAE : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage au Sénégal.

Saïdou, A., Dossa, A. F. E., Gnanglè, P. C., Balogoun, I., & Aho, N. (2012). Évaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (Vitellaria paradoxa CF Gaertn.) et à néré (Parkia biglobosa Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), (11), 1-9.

Sambiani, D., Kanda, M., Atato, A., Folega, F., Wala, K., & Akpagana, K. (2023). Cartographie et caractérisation écologique des formations végétales à épineux du socle Eburnéen au Togo. *Revue Écosystèmes et Paysages (Togo)*, 3(2), 1–12. https://doi.org/10.59384/recopays.tg3218

Sarr, M. (2005). La gestion des ressources naturelles au contact aire protégée/Territoire communautaire dans le Ferlo Sud : Le cas de la communauté rurale de Oudallah, Rapport de mission, 90 pages.

Sarr, M. S. (2002). Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo*, Retrieved from https://journals.openedition.org/cybergeo/22707

Sarr, M. S., Duponnois, Lesueur, & Diouf. (2005). Nitrogen fixation and assimilation by some woody species in a Sahelian parkland (Ferlo, Senegal). *Biotechnology Journal*, *117*(4), 463-478.

Sarr, O., Bakhoum, A., Diatta, S., & Akpo, L. E. (2013). L'arbre en milieu soudano-sahélien dans le bassin arachidier (Centre-Sénégal), 4515–4529.

Sarr, O., Diatta, S., Gueye, M., Ndiaye, P. M., Guissé, A., & Akpo, L. E. (2013). Importance des ligneux fourragers agropastoral au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Revue Médecine Vétérinaire*, *164*(1), 2-8.

Sarr, O., Ngom, D., Diatta, S., & Ickowicz, A. (2020). Usages des fourrages ligneux et pratiques pastorales dans la communauté rurale de Téssékéré, Ferlo, Nord Sénégal. Retrieved from https://doi.org/10.19182/remvt.31890

Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., et Scholes, M. C. (2015). Cycles biogéochimiques et biodiversité comme moteurs clés des services écosystémiques fournis par les sols. Sol, 1(2), 665-685.

Taonda, A., N'Guessan, A. E., Kouakou, A. B., Ouedraogo, H., & Kassi, N. J. (2023). Structure et potentiel de séquestration de carbone de la forêt classée de Foumbou à Korhogo au nord de la Côte d'Ivoire. *Revue Écosystèmes et Paysages (Togo)*, *3*(2), 1-12. https://doi.org/10.59384/recopays.tg3216

Wane, A., Ancey, V., & Grosdidier, B. (2006). Les unités pastorales du Sahel sénégalais, outils de gestion de l'élevage et des espaces pastoraux. *Développement Durable et Territoires, Dossier 8*, 0-18. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.3292